

Análisis de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios con inyección horizontal de fluidos

Slope stability analysis in landfills with horizontal fluids injection

Gianfranco Dacci, Nicolás Tasso & Mauro Codevilla

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina, gdacci@fi.uba.ar

Mauro Codevilla

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Nicolás Tasso

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN: La inyección de fluidos en rellenos sanitarios de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) permite acelerar los procesos de descomposición y degradación de los desechos contenidos en su interior, como así también el incremento de producción de biogás. Esto trae ventajas en distintos aspectos operativos y de diseño que vuelven más sustentable al relleno sanitario como técnica de disposición final de nuestros desechos. Sin embargo, también implica un riesgo para la estabilidad del relleno por la reducción en la resistencia al corte producto del incremento de presión de poros asociado a la inyección. La implementación de un sistema de inyección de fluidos debe ser contemplada y cuidadosamente estudiada en la etapa de diseño, momento en el cual prácticamente no se cuenta con información acerca de las características físicas, mecánicas e hidráulicas del material a modelar. En este trabajo se estudia la sensibilidad del factor de seguridad global por la falla de talud para distintos escenarios o condiciones de operación en su vida útil. Se busca generar conocimiento sobre la modelación de taludes de rellenos sanitarios, compuestos por materiales altamente heterogéneos y de comportamiento complejo. Adicionalmente, se pretende obtener conclusiones acerca de los métodos y técnicas más adecuadas para modelar y proyectar un relleno sanitario con inyección de fluidos y generar un punto de partida para aplicar esta tecnología en nuestro país.

ABSTRACT: Fluids injection in municipal solid waste (MSW) landfills allows for the acceleration in the process of decomposition and degradation of the refuse lying within them and an increase in biogas production rates. This poses advantages in different design and operational aspects that can make landfills a more sustainable practice for the final waste disposal. Nonetheless, it also implies a risk for the landfill's stability due to the reduction in shear strength by the increase on pore pressures associated to the fluid injection. The implementation of a liquids addition system must be contemplated and carefully studied during the landfill's design process, moment at which there is no information available regarding the physical, mechanical, or hydraulic characteristics of the material. This work studies the sensibility of the global factor of safety to slopes failure for different scenarios and operation conditions along the landfill's service life. It is intended to generate knowledge about the modelling of landfills' slopes, composed of strongly heterogeneous materials with complex behavior. In addition, it is expected to obtain conclusions regarding the most adequate methods and techniques for modelling and designing a landfill with liquids addition systems and to generate a trigger point for the implementation of this practice in our country.

PALABRAS CLAVE: rellenos sanitarios – estabilidad de taludes – resistencia al corte - lixiviados

KEYWORDS: landfills – slope stability – shear strength - leachate

1 INTRODUCCIÓN

La inyección de fluidos es una técnica originalmente ideada para favorecer el tratamiento de los lixiviados producidos en rellenos sanitarios (RS). Esta técnica incrementa la cantidad de fluido disponible en contacto con los residuos almacenados y acelera los procesos de descomposición biológica. Esto permite reducir el período de tiempo necesario para la degradación de los desechos; logrando que la descomposición biológica ocurra en un lapso en el cual los sistemas de control y operación del RS funcionan adecuadamente. Por otro lado, abarata el mantenimiento post-cierre e incrementa la producción de biogás, favoreciendo su aprovechamiento como una fuente de energía (Townsend et al. 2015).

Sin embargo, inyectar un fluido a presión dentro de un RS puede implicar riesgos para su operación y su integridad. Un diseño u operación inadecuados del sistema de inyección puede producir, entre otras cosas, desestabilización de los taludes del

relleno por la reducción en la resistencia al corte por incremento de la presión de poros. Por este motivo, la estabilidad de los taludes debe ser cuidadosamente estudiada desde la etapa de diseño cuando se quiera implementar la inyección de fluidos (Townsend et al. 2015).

Modelar los fenómenos que ocurren en un talud de un RS es una tarea compleja. Si bien el conjunto de residuos mezclados con suelo que componen al relleno puede analizarse como una masa geotécnica, la dispersión en los parámetros físicos, mecánicos e hidráulicos involucrados en el cálculo producen altos niveles de incertidumbre (Townsend et al. 2015). Estos parámetros dependen de la heterogeneidad de los materiales componentes, de la interacción entre ellos, e incluso de la variación en el tiempo de los procesos de descomposición. Por consiguiente, es relevante conocer cuáles son los parámetros que más influyen sobre la estabilidad del RS, y esto puede ser analizado calculando y evaluando la variabilidad del Factor de Seguridad (FoS) global del talud analizado.

2 PANORAMA ACTUAL DEL MODELADO DE INYECCIÓN DE FLUIDOS EN RELLENOS SANITARIOS

Varios investigadores han estudiado los RS con el objetivo de caracterizar los materiales componentes, evaluar su comportamiento y generar pautas de diseño tanto para la disposición tradicional de RS como para la aplicación de técnicas innovadoras tales como la inyección de fluidos.

Xu et al. (2012) realizaron un estudio donde evaluaron la variación del FoS con el tiempo para un talud hipotético en el cual se inyecta un fluido a presión a través de una galería horizontal. La inyección fue simulada mediante un análisis de flujo transitorio y el FoS fue calculado con el método de equilibrio límite (LE) a distintas instancias de tiempo. Adicionalmente, los autores plantearon una serie de escenarios de interés para evaluar la respuesta del FoS ante distintas situaciones o configuraciones posibles de generarse durante la operación de un RS: i) el taponamiento del sistema de recolección y remoción de lixiviados (LCRS); ii) la generación de una capa de baja permeabilidad dentro del relleno que obstaculiza el drenaje por gravedad del fluido inyectado; iii) la incidencia de colocar una capa de cobertura externa sobre el talud para prevenir lixiviación de líquidos hacia el exterior y iv) la aplicación de distintos valores y patrones de presiones de inyección. Los escenarios planteados resultaron en una disminución del FoS en todos los puntos de tiempo con respecto al modelo base original y las situaciones más críticas suceden cuando se produce una importante acumulación de lixiviados y un consecuente incremento de las presiones neutras.

A su vez, en el trabajo indicado se incluye un análisis de sensibilidad del FoS a algunos parámetros como: cohesión efectiva (c'), ángulo de fricción interna (ϕ'), conductividad hidráulica (k), anisotropía (k_x/k_y), pendiente del talud y peso unitario (γ). Los resultados obtenidos arrojaron que el FoS es más sensible a los parámetros mecánicos y a la geometría del talud.

Si bien los autores introdujeron los parámetros del modelo constantes en toda la geometría, esto podría no ser realista, dada la enorme dispersión que se observa en las mediciones in situ y la falta de un método normalizado que genere comparabilidad entre dichos resultados (Dixon & Jones 2005, Zekkos et al. 2006).

3 TRABAJO REALIZADO

3.1 Escenarios de estudio

El presente trabajo busca complementar los resultados obtenidos por Xu et al. (2012), partiendo de su modelo base, compuesto por los parámetros indicados en la Tabla 1 y la geometría esquematizada en la Figura 1. El objetivo es conocer cuáles son los parámetros trascendentales del RS que más influyen en su estabilidad, considerando aspectos más sofisticados en el modelo, tales como: i) la variabilidad espacial de algunos parámetros; ii) la relación no lineal entre la resistencia al corte y la tensión normal (Stark & Huvaj 2008, Daciolo et al. 202) y iii) el comportamiento del material en condición no saturada.

Se espera que los nuevos aspectos analizados en este trabajo permitan reducir la incertidumbre en las distintas etapas del diseño, enfocándose en aquellos parámetros y factores más influyentes. Se utilizaron los programas SEEP/W y SLOPE/W de Geo-Slope International para desarrollar el modelo. La inyección de fluido y el incremento de presiones de poros con el tiempo fueron modelados utilizando un análisis de flujo transitorio en SEEP/W. El factor de seguridad fue calculado usando el método de equilibrio límite, a distintas instancias de tiempo, utilizando el programa SLOPE/W. El análisis se realizó con el método de Morgenstern-Price (1965). Las superficies de

falla circulares se definieron a partir de puntos de entrada y salida y se optimizó la superficie crítica hasta obtener una diferencia entre FoS sucesivos de $1,0E-7$.

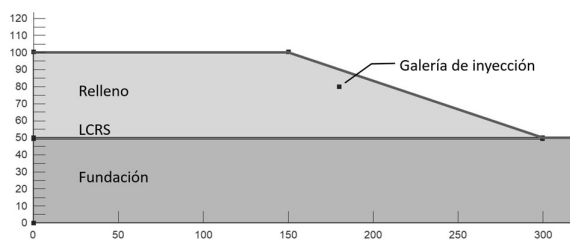


Figura 1. Geometría del talud utilizada.

Tabla 1. Parámetros del modelo base utilizado (idem Xu et al. 2012).

Parámetros	Valor
Altura del relleno [m]	50
Pendiente del talud [-]	3:1
Elevación de la galería de inyección [m]	30
Distancia de la galería a superficie del talud [m]	30
Conductividad hidráulica vertical de residuos (k_y) [cm/s]	$1e-05$
Anisotropía de los residuos (k_x/k_y) [-]	10
Peso unitario de los residuos (γ) [kN/m ³]	15
Cohesión de los residuos (c') [kPa]	15
Ángulo de fricción de los residuos (ϕ') [°]	35
Cohesión del LCRS (c'_{LCRS}) [kPa]	0
Ángulo de fricción del LCRS (ϕ'_{LCRS}) [°]	22
Cont. Vol. de humedad de saturación de residuos [m ³ /m ³]	0,50
Presión de inyección [kPa]	49

El trabajo realizado se compone de 4 escenarios, análogos a los planteados por el trabajo citado: Escenario 0 (base); Escenario 1 (LCRS taponado) y Escenarios 2 y 3 (estratos de baja conductividad hidráulica en el cuerpo del RS).

3.2 Aspectos generales a todos los Escenarios

Para todos los escenarios planteados, la geometría 2D consiste en un talud de residuos apoyado sobre un terreno competente (fundación), tal como se esquematiza en la Figura 1. Se dispone el LCRS entre el RS y la fundación, el cual se modela como una capa drenante capaz de evacuar el líquido contenido en el RS. Para esto se definió una condición de borde de energía piezométrica igual a cero a lo largo de la interfaz entre los residuos y el LCRS. La fundación fue modelada como un material impermeable y de capacidad portante muy superior al relleno a los efectos de evitar análisis de estabilidad por fallas en la base.

Se utilizaron tres valores de presión de inyección: 49 kPa, 98 kPa y 147 kPa, aplicados de manera puntual en la cercanía del talud, y siguiendo los lineamientos de Xu et al. (2012). Esta presión fue mantenida en el tiempo durante un período de 3000 días (8,22 años). Para distintas instancias de tiempo, se determinó el campo de presiones de poros en el talud y se determinó el FoS asociado.

Para poder modelar la etapa de inyección teniendo en cuenta la incidencia de la succión en el contenido de humedad y en la conductividad hidráulica, se incorporó una curva de retención (SWRC). La SWRC empleada fue obtenida por Wu et al. (2012) para una muestra de 10 años, compuesta por material extraído de un RS en Pekín, China. Esta curva fue escogida debido a la similitud de resultados entre los alcanzados por Xu et al. (2012) y el caso base. De esta manera, es posible comparar los resultados, y así complementar los trabajos. La SWRC y su dependencia con la conductividad hidráulica están representadas

en la Figura 2 y Figura 3, respectivamente. El ajuste utilizado fue el propuesto por van Genuchten (1980).

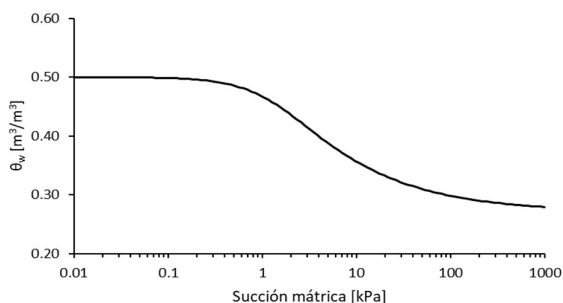


Figura 2. Contenido de humedad volumétrica vs. succión mátrica.

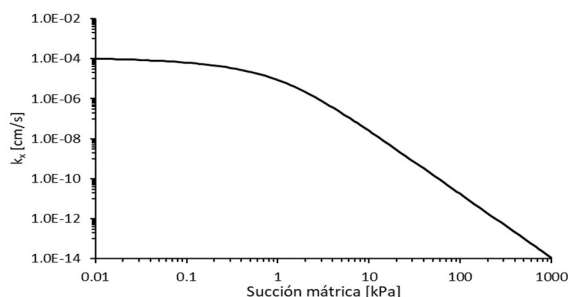


Figura 3. Conductividad hidráulica horizontal vs. succión mátrica.

3.3 Aspectos particulares a cada Escenario

El Escenario 0 (base) corresponde a la geometría del talud de la Figura 1 funcionando en forma satisfactoria.

El Escenario 1 elimina la capacidad del LCRS de permitir la evacuación del líquido generado por el RS, representando así una condición de taponamiento total. Esta situación podría presentarse por un inadecuado diseño o mala construcción.

Los Escenarios 2 y 3 consideran un posible estrato de baja conductividad hidráulica ($1 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$) que se interpone entre el punto de inyección y el LCRS. El estrato fue ubicado 5.0 m por debajo de la galería de inyección. Esta situación es común en RS, y puede tener varias causas: la colocación de una cobertura diaria compuesta de un suelo de aporte compactado de baja conductividad hidráulica (Escenario 2) o la presencia de residuos plásticos en gran cantidad (Escenario 3).

Estos últimos escenarios difieren en la definición de la resistencia de la capa poco permeable. Si bien la resistencia al corte en las mezclas suelo-residuo es mayor cuanto mayor sea la proporción y calidad del suelo presente (Hossain & Haque 2009), se adoptó una resistencia igual a la del RS restante para el Escenario 2. En el Escenario 3, en cambio, sí se consideró una reducción de la resistencia al corte; se asignaron al estrato de baja conductividad hidráulica los mismos valores $c' = 0$ y $\phi' = 22^\circ$ que al LCRS. Estos valores buscan simular la interfaz entre los residuos y los elementos plásticos y también son acordes a la resistencia al corte medida sobre muestras en un estado con predominio de materiales plásticos (GeoSyntec Consultants 2007, Hossain & Haque 2009).

3.4 Modelos de análisis

Para cada uno de los Escenarios, se plantean cuatro casos que corresponden a los aspectos que se buscan analizar. En primer lugar, se planteó un modelo base análogo al analizado por Xu et al. (2012). Se conservaron la geometría y los valores de los distintos parámetros mostrados en la Figura 1 y Tabla 1. Este caso fue denominado Modelo A.

El Modelo B considera una variación del peso unitario del RS con la profundidad. Su valor y cómo este varía con la profundidad, dependen de diversos factores: características de los residuos y suelo presentes, grado de compactación, nivel de presiones, edad del relleno, entre otros. Zekkos et al. (2006) propusieron tres curvas de ajuste dependientes del grado de compactación (GC) aportado en la colocación del relleno, las cuales se muestran en la Figura 4.

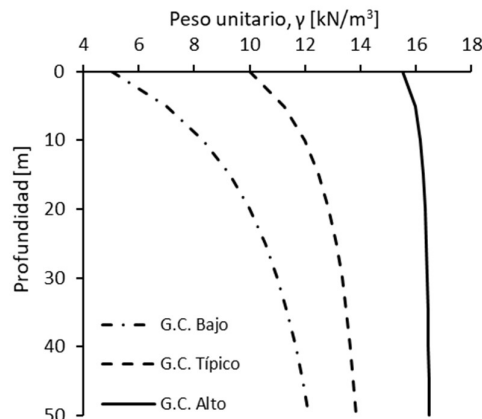


Figura 4. Peso unitario RS vs. profundidad y grado de compactación.

En el Modelo C se considera la resistencia al corte no lineal. Stark & Huvaj (2008) y Daciolo et al. (2022) recopilaron resultados obtenidos en diversas pruebas de corte directo y ensayos triaxiales sobre muestras procedentes de RS. En todos los casos se observó un incremento monótonico de la resistencia al corte con el avance de la deformación, sin alcanzar un pico y un posterior ablandamiento. Algunos de ellos alcanzan niveles de deformación altos (150 mm de desplazamiento por corte y 30 % a 40 % de deformación axial). Stark et al. (2009) proponen una serie de envolventes de resistencia al corte en función del esfuerzo normal para distintos valores de deformación. Para modelar la resistencia al corte en este caso, se empleó la envolvente correspondiente a 10% de deformación axial dado que este valor de deformación resulta compatible con la respuesta mecánica de los materiales geosintéticos en la interfase con el suelo de fundación (Eid et al. 2000).

Dado que las envolventes propuestas por Stark & Huvaj (2008) no contienen datos más allá de los 400 kPa de esfuerzo normal y que la información disponible para niveles de presión mayores es escasa, se estableció dicho valor como límite superior. La curva utilizada se muestra en la Figura 5.

El Modelo D contempla la resistencia al corte del material en condición no saturada. Si bien durante la inyección de fluido habrá sectores del relleno que se saturan, otras partes permanecerán no saturadas y con distintos niveles de succión. Se incorporó ángulo $\phi^b = 17^\circ$ a los efectos de ampliar la envolvente de Mohr-Coulomb contemplando el aporte de resistencia de la succión mátrica. Al no existir ensayos para medir el ángulo ϕ^b en RS, se adoptó un valor medio entre los obtenidos para diversos tipos de suelos finos (Fredlund & Rahardjo 1993).

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Influencia del peso unitario dependiente con la profundidad

En la Figura 10 se muestra cómo varía el FoS luego de los 3.000 días de inyección de presión de fluido para los distintos grados de compactación indicadas en la Figura 4. Se incorpora el FoS obtenido en el Modelo A, a fin de comparar con el caso base.

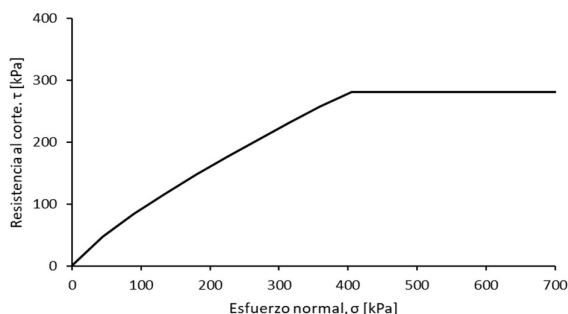


Figura 5. Resistencia al corte para distintos valores de esfuerzo normal correspondientes a una deformación axial de 10%.

La modelación de un peso unitario correspondiente a grados de compactación altos no difirió del modelo base dado que en estos casos γ no presenta una fuerte variación con la profundidad (Zekkos et al. 2006). En contraste, el FoS es menor para los grados de compactación bajo y típico, e incluso es mayor la diferencia con respecto al Modelo A cuanto más sea la presión de inyección aplicada. Esto se debe a que, dado un menor peso unitario y mayores sobrepresiones de poros, la componente de resistencia al corte cae más abruptamente que la carga desestabilizante producida por el peso propio de la masa de relleno.

La Figura 6 muestra la cuña de deslizamiento crítica para $t = 3.000$ días del Escenario 1 con grado de compactación típico. La falla corre cercana a la superficie como consecuencia de lo ya expuesto.

4.2 Influencia de la resistencia al corte no lineal

La Figura 11 muestra los FoS calculados para los distintos escenarios modelados según los Modelos A, C y D y luego de haber transcurrido 3.000 días de inyección de fluidos.

Para los escenarios 0 y 1 no se aprecia una diferencia entre los Modelos analizados. En el Escenario 2, en cambio, al incorporarse una barrera de menor conductividad hidráulica a mitad de la profundidad, el Modelo C alcanzó FoS considerablemente menores que los Modelos A y B. Las figuras Figura 7 a Figura 9 ilustran las superficies de deslizamiento del Modelo C asociadas a cada escenario. Las líneas de falla más críticas obtenidas en el Escenario 2 son en su mayoría cercanas a la superficie. Esto se debe a que el modelo castiga fuertemente a los estratos superiores donde las presiones efectivas todavía son bajas y están afectadas por la alta presión de poros acumulada.

El comportamiento del Escenario 3 es similar en tanto las superficies de falla más críticas se presentan a baja profundidad. Sin embargo, en este caso el desarrollo de la falla está dominada por la reducida resistencia al corte que posee la barrera impermeable compuesta por materiales plásticos. De este modo, el FoS para del Modelo C no difiere tan fuertemente de los otros dos modelos como sucede en el escenario anterior.

En los escenarios 0 y 1 las fallas involucraron mayor masa del talud, alcanzando el LCRS donde su baja resistencia al corte domina la formación del mecanismo de falla. Por otro lado, para los niveles de presiones alcanzados luego de modelada la inyección de líquido, la resistencia al corte obtenida a lo largo de toda la superficie de falla resultó similar tanto trabajando con c', ϕ' constantes como dependientes de la tapada. De esta manera, el FoS calculado no difiere prácticamente entre los modelos propuestos.

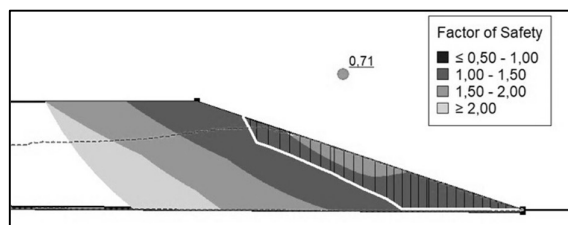


Figura 6. Cuña de falla del Modelo B, Escenario 1 con un grado de compactación típico y 147 kPa de inyección. Las regiones en escala de grises indican zonas por donde pasan cuñas con distintos FoS. En punteado se muestra la posición del nivel de líquido en interior del RS.

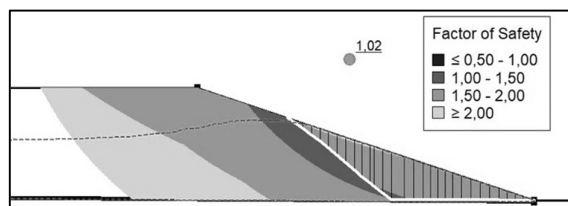


Figura 7. Cuña de falla del Modelo C, Escenario 1. 98 kPa de inyección.

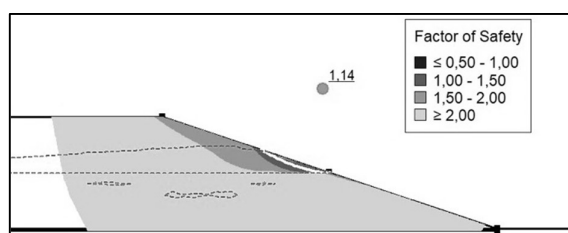


Figura 8. Cuña de falla del Modelo C, Escenario 2. 98 kPa de inyección.

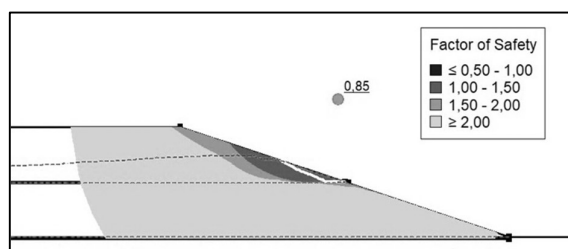


Figura 9. Cuña de falla del Modelo C, Escenario 3. 98 kPa de inyección.

4.3 Influencia del parámetro ϕ^b

La incorporación del ángulo ϕ^b para considerar el aporte de resistencia no saturada no afectó al FoS obtenido. En los escenarios donde se produce acumulación de presiones de poros es un resultado esperable dado que gran parte del relleno se encuentra en condición saturada. Sin embargo, tampoco hubo una incidencia apreciable en ninguno de los casos del Escenario 0, donde el adecuado drenaje permite que haya una mayor porción del material sin alcanzar la saturación.

4.4 Resumen de los factores de seguridad obtenidos

En la Tabla 2 se presenta en forma sintética todos los valores de FoS calculados para cada una de las combinaciones de Escenarios y Modelos indicados anteriormente. Se destaca en color negro aquellos valores que no verifican $FoS > 1.3$.

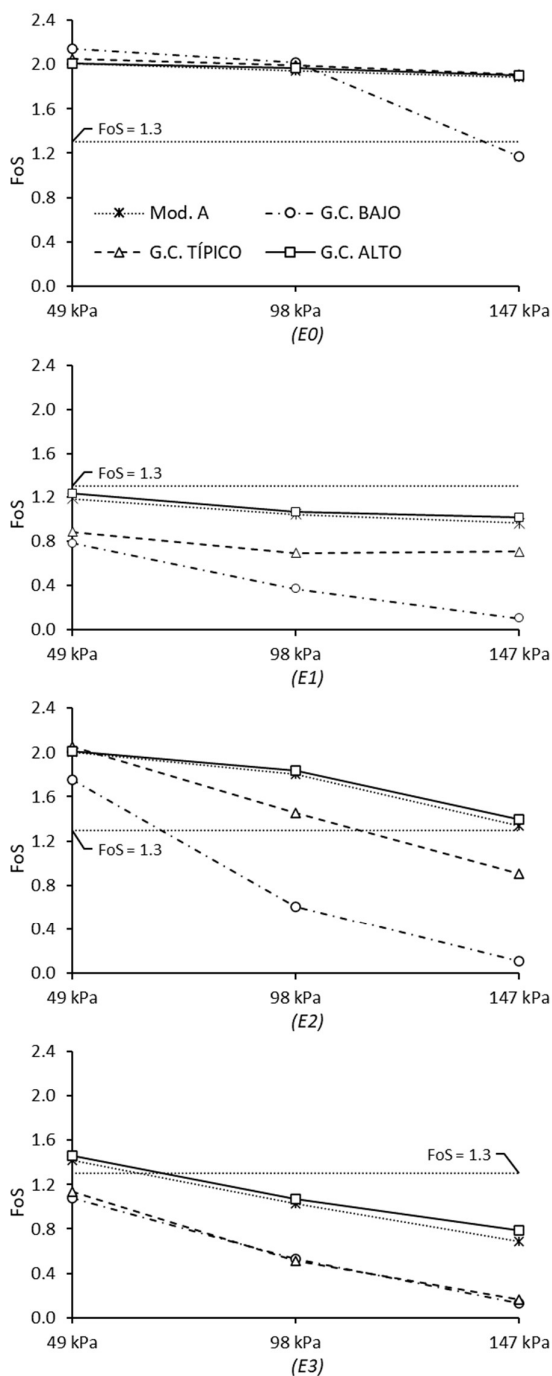


Figura 10. FoS en función de la presión de inyección para cada curva de peso unitario vs profundidad para Modelos A y B. E0, E1, E2 y E3 corresponden a los distintos escenarios planteados.

5 CONCLUSIONES

Se analizaron distintos aspectos en la estabilidad de un relleno sanitario: i) la variabilidad espacial del peso unitario; ii) la relación no lineal entre la resistencia al corte y la tensión normal, y iii) el aporte en resistencia al corte en condición no saturada.

Se obtuvieron un total de 72 FoS para todas las combinaciones de Escenarios y Modelos calculados. Del total, solamente unos 35 verificaron $FoS > 1,30$, siendo este valor una condición de estabilidad de talud segura.

La dependencia del peso unitario con la profundidad influye

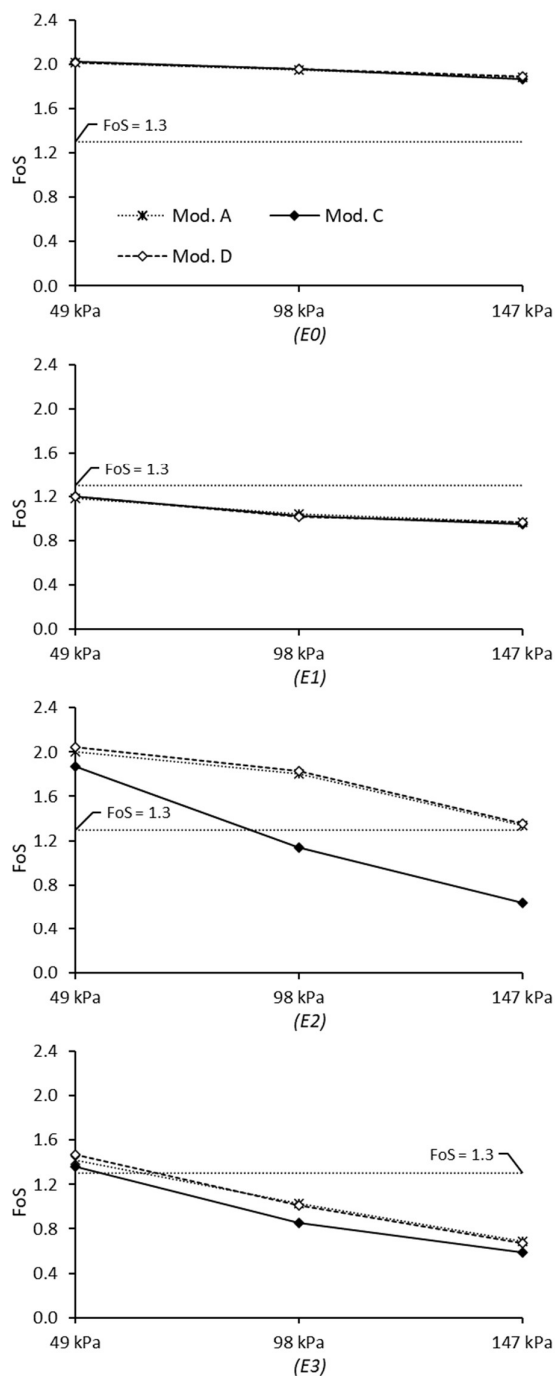


Figura 11. FoS en función de la presión de inyección para los Modelos A, C y D. E0, E1, E2 y E3 corresponden a los distintos escenarios planteados.

en el FoS, principalmente si no es posible garantizar un nivel de compactación óptimo y uniforme en todo el relleno. El decrecimiento en el FoS es mayor cuanto menor sea el grado de compactación del material. Se debe destacar que el peso unitario presenta una alta variabilidad y, por lo tanto, resulta necesario realizar ensayos en campo y en laboratorio para poder generar curvas de distribución adecuadas a cada caso de estudio.

Con respecto a los parámetros de resistencia al corte, si bien Xu et al. (2012) encontraron que el FoS tiene gran sensibilidad a los parámetros adoptados, la relación en la que se los modela, sea

lineal o no lineal, no tiene una incidencia destacable. La mayoría de los modelos propuestos por distintos autores proveen una distribución de c' y ϕ' con la profundidad, cuyo comportamiento no difiere tanto de la adopción de parámetros constantes. Se debe prestar atención a cuánto castigan los modelos empleados a las capas superficiales del relleno dado que, en escenarios de todas maneras desfavorables, pueden obtenerse superficies de deslizamiento con muy bajos valores de factor de seguridad, que no necesariamente se condicen con un riesgo real.

La adopción del parámetro ϕ^b para contemplar el comportamiento no saturado prácticamente no influye en los resultados. Sin embargo, se debe destacar que este parámetro y el método de equilibrio límite no consideran cambios volumétricos asociados a la desaturación, los cuales podrían ser causantes de una seguridad menor.

Finalmente, para que cualquiera de los modelos planteados sea lo más coherente con la realidad del relleno sanitario siendo diseñado o estudiado, se necesita contar con buena y cuantiosa información acerca de las características de los residuos que llegan a la etapa de disposición final y se debe garantizar que estos presenten características medianamente predecibles para ayudar a reducir la dispersión. En este último aspecto entra en juego las etapas previas de la gestión de residuos, la cual debe ser integral para que todos los profesionales involucrados en las distintas posiciones de la cadena puedan contar con información confiable.

Tabla 2. FoS a 3000 días de inyección para cada Escenario.

Modelo	Escenario	Grado de Compactación	FoS		
			49 kPa	98 kPa	147 kPa
Mod. A	E 0	-	2,01	1,94	1,88
	E 1	-	1,18	1,04	0,96
	E 2	-	2,00	1,80	1,33
	E 3	-	1,42	1,02	0,68
Mod. B	E 0	G.C. Bajo	2,14	2,01	1,17
		G.C. Típico	2,05	1,99	1,91
		G.C. Alto	2,01	1,96	1,90
		G.C. Bajo	0,77	0,36	0,10
	E 1	G.C. Típico	0,88	0,69	0,70
		G.C. Alto	1,22	1,06	1,01
		G.C. Bajo	1,75	0,60	0,10
	E 2	G.C. Típico	2,05	1,45	0,90
		G.C. Alto	2,00	1,83	1,39
		G.C. Bajo	1,07	0,52	0,12
	E 3	G.C. Típico	1,13	0,51	0,16
		G.C. Alto	1,46	1,06	0,78
Mod. C	E 0	-	2,02	1,96	1,86
	E 1	-	1,19	1,02	0,94
	E 2	-	1,86	1,13	0,63
	E 3	-	1,36	0,85	0,59
Mod. D	E 0	-	2,01	1,95	1,89
	E 1	-	1,18	1,00	0,96
	E 2	-	2,04	1,82	1,35
	E 3	-	1,46	1,01	0,67

6 REFERENCIAS

Daciolo N.V.C., de Souza Correia N., Gimenez Boscov M.E. (2022). *Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: Proposal for data classification. Waste Management* 140, 245-259.

Dixon N., Jones D.R.V. (2005). *Engineering properties of municipal solid waste. Geotextiles and Geomembranes* 23 (3), 205-233.

Eid H., Stark T.D., Evans W.D., Sherry P. (2000). *Municipal solid waste slope failure I: waste and foundation soil properties. J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 126 (5), 397-407

Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993). *Shear Strength Theory. Soil Mechanics for Unsaturated Soils* (p. 229). John Wiley & Sons, New York.

GeoSyntec Consultants. (2007). *Reviewers checklist: Slope stability analysis*. Prepared as part of the Fundamentals of Slope Stability and Settlement for Solid Waste Disposal Facilities, Univ. of Florida TREEO Center, Orlando, FL.

Hossain M.D.S., Haque M.A. (2009). *The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. Waste Management* 29 (5), 1568-1576.

Morgenstern, N.R. & Price, V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surface. Geotechnique* 15(1), 79-93.

Stark T.D., Huvaj N. (2008). *Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. Environmental Earth Sciences* 57 (8), 1911-1923.

Townsend T.G., Powell J., Jain P., Xu Q., Tolaymat T., Reinhart D. (2015). *Sustainable Practices for Landfill Design and Operation*. Springer, New York.

van Genuchten M.T. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5), 892-898.

Wu H., Wa H., Zhao Y., Chen T., Lu W. (2012). *Evolution of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste with landfill depth and age. Waste Management* 32 (3), 463-470.

Xu Q., Tolaymat T., Townsend T. G. (2012). *Impact of pressurized liquids addition on landfill slope stability. J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 138 (4), 472-480.

Zekkos D., Bray J.D., Kavazanjian E., Matasovic N., Rathje E.M., Riemer M.F., Stokoe K.H. (2006). *Unit weight of municipal solid waste. J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132 (10), 1250-1261.